

Dr hab. inż. Piotr Bała

Kraków, dn. 24.05.2016

Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej

Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica

Al. A. Mickiewicza 30

30-059 Kraków

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Skuzy

pt. „Wieloskalowa charakterystyka połączeń w platerach Ti/Cu spajanych

metodą wybuchową”

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Dyrektora Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej im. Aleksandra Krupkowskiego Polskiej Akademii Nauk w Krakowie, Pana Prof. dr hab. inż. Pawła Zięby, w związku z uchwałą Rady Naukowej Instytutu z dnia 17 marca 2016 roku (pismo z dnia 01 kwietnia 2016 roku o numerze IMIM/DP/752/2016)

### 1. Opis formalny pracy

Praca doktorska mgr inż. Wojciecha Skuzy stanowi szeroki opis złącza blach Cu oraz Ti wykonanego metodą spajania wybuchowego. Praca ma układ klasyczny, liczy 93 strony, składa się z 7 rozdziałów oraz spisu literatury. Rozdział pierwszy jest 3 stronicowym wstępem, w którym Autor uzasadnia swoje zainteresowanie i jednocześnie wprowadza czytelnika w zagadnienie spajania wybuchowego. W rozdziale drugim zatytułowanym „Wstęp teoretyczny” Autor opierając się na dobrze dobranym zbiorze literaturowym przedstawił najistotniejsze zagadnienia dotyczące spajania wybuchowego. Rozdział ten liczy 17 stron. Rozdział trzeci to „Teza i cel pracy”. Rozdział następny (czwarty) to opis metodyki badań, tj. metodyka wykonywania złączy oraz pobierania próbek do badań jak również opis wykorzystanych technik badawczych. Główną część rozprawy stanowi rozdział piąty „Wyniki badań”, w którym Autor przedstawił liczne wyniki badań, których dyskusję przeprowadził

w rozdziale następnym. Merytoryczna część rozprawy kończy się rozdziałem „Podsumowanie i wnioski”. Na końcu rozprawy zamieszczony jest spis literatury zawierający 103 pozycje, z których 58 opublikowano w ostatnim dziesięcioleciu. Większość cytowanych prac opublikowano w języku angielskim.

## **2. Tematyka rozprawy**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy spajania wybuchowego, które stanowi alternatywę dla innych technik łączenia w stanie stałym, jak walcowanie czy też zgrzewanie dyfuzyjne. Złącza Cu/Ti znajdują zastosowanie, gdzie wymagana jest dobra przewodność elektryczna w warunkach korozyjnych. Uważam, że tematyka opiniowanej rozprawy wpisuje się w aktualny nurt poszukiwań technik łączenia metali, a podjęty aspekt badań szczegółowych jest oryginalny i stanowi alternatywę do klasycznych metod wykorzystywanych do wykonywania złączy Cu/Ti w warunkach przemysłowych.

## **3. Teza i cel pracy**

Bazując na przeglądzie literaturowym, zawierającym 103 pozycje Autor przedstawił następującą tezę badawczą: „... parametry technologiczne procesu spajania oraz długotrwałe oddziaływanie temperaturowe w procesie wyżarzania platerów prowadzą do silnych zmian w pobliżu strefy połączenia dwuwarstwowych układów platerów na bazie miedzi i tytanu, determinując finalną mikrostrukturę i własności wyrobu”. W świetle przedstawionego przeglądu literaturowego postawiona teza rozprawy jest słuszna, choć intuicyjnie wydaje się oczywista. Ze sformułowanej tezy wynikają jasno cele pracy prowadzące do identyfikacji i opisu zjawisk w procesie spajania i wygrzewania badanych złączy.

## **4. Opis metodyki badawczej**

Do zweryfikowania postawionej tezy badawczej Autor wytworzył i przebadał 17 układów. Złącza wykonane były przy zastosowaniu 6 różnych odległości pomiędzy blachami (1,5 ÷ 9,0 mm), dobranych w oparciu o grubość płyty lotnej oraz przy zastosowaniu 3 różnych prędkości detonacji z zakresu 2000÷3000 m/s. Autor przeprowadził obszerne badania makro i mikrostruktury połączone z analizą składu chemicznego poszczególnych faz występujących w badanych złączach oraz własności mechanicznych złączy. Doktorant zastosował szeroki wachlarz metod badawczych, a ich wybór uważam za właściwy i niezbędny do realizacji

celów pracy. Doktorant wykorzystał między innymi mikroskopię świetlną, mikroskopię elektronową skaningową połączoną z analizą EDS oraz z wykorzystaniem techniki EBSD, mikroskopię elektronową transmisyjną połączoną z analizą EDS, rentgenowską analizę fazową, badania wytrzymałości na ścinanie w próbie rozciągania, pomiary mikrotwardości i oporności elektrycznej.

## **5. Ocena merytoryczna pracy**

Opiniowana rozprawa Doktorska mgr inż. Wojciecha Skuzy zasługuje na wysoką ocenę. Jest napisana w sposób niezwykle staranny i dojrzały. Na każdym etapie jej czytania widać przemyślany dobór materiału oraz, co warto podkreślić, przejrzyste przedstawienie wyników. Poczynając od „Wstępu teoretycznego”, w którym Autor bardzo dobrze wskazuje elementy które mają wpływ na proces spajania dyfuzyjnego, przez metodologię, gdzie skrupulatnie objaśnił co, jak i w jakim celu zrobił, po opis wyników badań własnych i ich analizę, na podstawie których udowodnił tezę, że parametry technologiczne procesu spajania wybuchowego mają silny wpływ na zmiany w pobliżu strefy połączenia dwuwarstwowych układów platerów na bazie miedzi i tytanu. Ciekawym z punktu widzenia aplikacyjnego jest wskazanie przy dokładnie jakich parametrach uzyskuje się najlepsze złącza oraz jakie elementy makro i mikrostruktury złącz decydują o ich finalnych właściwościach.

## **6. Uwagi szczegółowe**

Chciałbym pokreślić, że opiniowaną rozprawę oceniam bardzo dobrze. Jest napisana poprawnie przede wszystkim merytorycznie, jak również językowo, zawiera logiczną analizę i poparte wynikami badań dyskusję i wnioski. Wnikliwa analiza rozprawy nasuwa kilka uwag szczegółowych oraz pytań:

1. Do zamieszczonego na rysunku 14 rozkładu twardości brakuje informacji na temat łączonych metodą wybuchową metali.
2. Szkoda, że nie wykonano analizy próbek w pobliżu złącza po ich zerwaniu w badaniu wytrzymałości na ścinanie w próbie rozciągania. Rodzi się bowiem pytanie, czy na „osłabienie” miedzi nie wpłynęło jej lokalne nagrzanie? Dodatkowo pewne zastrzeżenia budzi brak szczegółowego opisu wykonywania próbek do ww. badań. W jaki sposób wykonywano nacięcia w materiale rodzimym od strony miedzi

- i tytanu? Jaka była geometria po nacięciu, bo mogło to mieć wpływ na otrzymane wyniki.
3. Nie wyjaśniono dlaczego do testów zginania wybrano temperaturę otoczenia,  $-60^{\circ}\text{C}$  i  $-196^{\circ}\text{C}$  (ciekłego azotu). Dyskusja wyników testów zginania zamieszczona na stronie 48 jest poprawna, lecz w odniesieniu do dyskusji innych wyników badań budzi niedosyt.
  4. Moim zdaniem linie regresji na rysunku 36 ze strony 50 nie powinny przedstawiać zależności proporcjonalnych. W zakresie zastosowanych prędkości detonacji przy odległości pomiędzy blachami 6-7,5 mm następuje skokowy wzrost względnej oporności. Doktorant tłumaczy ten fakt w tekście, występowaniem obszarów przetopionych oraz zmianami w morfologii złącza, co wydaje się logiczne.
  5. Trudno zgodzić się ze stwierdzeniem Autora str. 55 i 81, że łączono metale o dobrej przewodności cieplnej. Oczywiście jest to prawda w odniesieniu do Cu, ale nie w odniesieniu do Ti.
  6. Na stronie 57 Autor opisuje, że zidentyfikowano fazę  $\text{CuTi}_3$ , przy czym na rysunku 43 pokazana jest prawidłowa faza  $\text{Cu}_3\text{Ti}$ .
  7. Wydaję się, że tabele 7 i 8 są zbędne, gdyż te same wyniki zaprezentowano na wykresach (rys. 48 i 49). Autor wprawdzie wyjaśnia w tekście dlaczego tak zrobił, lecz osobiście uważam, że można było zrezygnować z zamieszczania ww. tabel.
  8. Dyskusja ze stron 79-80 odnosząca się do czynnika dominującego w procesie spajania wybuchowego jest moim zdaniem nadinterpretacją. Autor słusznie wskazuje, że dominująca rolę ma odkształcenie plastyczne, po czym poddaje w wątpliwość swoje wyniki i dywaguje na temat obszarów przetopionych. Nie byłoby obszarów przetopionych, gdyby nie silny wzrost temperatury wywołany odkształceniem plastycznym. Szczególnie w tytanie przy odkształceniu z dużymi prędkościami generuje się silny wzrost temperatury. Obszary przetopione i ewentualne obszary zrekrystalizowane są wynikiem właśnie tego wzrostu temperatury.
  9. Zamieszczone w pracy wnioski uważam za poprawne, choć ustawienie ich w odniesieniu do skali w jakiej je obserwowano (makro, mikro, nano) czy stwierdzono wydaje się rozwiązaniem nieoptymalnym.

10. Autor w odniesieniu do mikrostruktury wymiennie używa słów „struktura” i „mikrostruktura”. Dodatkowo w kilku miejscach używa „mikroskopia optyczna”, zamiast „mikroskopia świetlna”.
11. W wykazie literatury brak jest pozycji autorstwa lub współautorstwa Doktoranta.
12. W pracy znaleziono nieliczne literówki lub błędy stylistyczne, które wskazano Doktorantowi w bezpośredniej rozmowie.

## **7. Wniosek końcowy**

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa jest dobrze ulokowana w obecnym stanie wiedzy, została wykonana i napisana bardzo starannie, przy dużym nakładzie pracy i przy użyciu właściwie dobranych technik badawczych. Zamieszczone nieliczne uwagi nie mają wpływu na moją jak najbardziej pozytywną opinię o całości pracy.

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr inż. Wojciecha Skuzy pt.: „Wieloskalowa charakterystyka połączeń w platerach Ti/Cu spajanych metodą wybuchową” stwierdzam, że spełnia ona wszystkie wymogi stawiane pracom doktorskim zawarte w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN w Krakowie o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

